

## 利用图谱特征解析和反演作物叶绿素密度

张东彦<sup>1,2</sup>, 刘良云<sup>3</sup>, 黄文江<sup>3</sup>, Coburn Craig<sup>4</sup>, 梁 栋<sup>1</sup>

- (1. 安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039;
2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;
3. 中国科学院数字地球重点实验室, 北京 100094;
4. Department of Geography, University of Lethbridge, Alberta T1K3M4, Canada)

**摘要:** 地面成像光谱仪可对作物个体及群体信息进行“图谱”同步解析, 因此在农业定量化研究中具有巨大的应用潜力。利用可见-近红外成像光谱仪采集不同生育期玉米和大豆的冠层“图谱”数据, 在逐步提取影像中光照土壤、阴影土壤、光照植被、阴影植被四种组分光谱的基础上, 通过选取的敏感波段构建光谱植被指数和叶绿素密度进行波段自相关分析, 探讨各个分量对作物叶绿素密度反演的影响。研究发现: 当植被与土壤混合存在时, 对叶绿素密度敏感的波段基本在红光与近红外波段; 当植被光谱提纯后(剔除土壤光谱), 对叶绿素密度敏感的波段范围增大, 表现在蓝、绿波段; 当阴影叶片光谱剔除后, 对叶绿素密度敏感的波段表现为可见光波段增加, 近红外波段减少, 红边波段决定系数最高。上述变化特征在不同作物中有相同的趋势, 为探索地面成像光谱仪“图谱”协同反演作物生化参数进行了有意义的探索。

**关键词:** 图谱解析; 光谱指数; 叶绿素密度; 大豆; 玉米

**中图分类号:** TP79; S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1871-11

## Inversion and evaluation of crop chlorophyll density based on analyzing image and spectrum

Zhang Dongyan<sup>1,2</sup>, Liu Liangyun<sup>3</sup>, Huang Wenjiang<sup>3</sup>, Coburn Craig<sup>4</sup>, Liang Dong<sup>1</sup>

- (1. Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China;
2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;
3. Key Laboratory of Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
4. Department of Geography, University of Lethbridge Alberta, T1K3M4, Canada)

**Abstract:** Field imaging spectrometer can be used to analyze growth information of individual and group crop relying on its data advantage with combination image and spectra as one, so it has great application potential in agricultural quantitative research. In this research, hyperspectral images of corn and soybean in different growth period were collect using visible and near-infrared imaging spectrometer (VNIS), and

收稿日期: 2013-02-25; 修订日期: 2013-03-26

基金项目: 中国科学院数字地球重点实验室资助(2012LDE003); 安徽省高等学校省级自然科学基金项目(KJ2013A026); 安徽省自然科学基金青年基金(1308085QC58); 国家自然科学基金(41071228, 61172127); 中国博士后科学基金(2013T60189); 安徽大学博士科研启动经费;

作者简介: 张东彦(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事高光谱图像处理及遥感定量化方面的研究。Email: hello-lion@hotmail.com

导师简介: 梁栋(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事模式识别、图像处理方面研究。Email: dliang@ahu.edu.cn

spectra of four components as illuminated soil, shadow soil, illuminated vegetation and shadow vegetation were gradually extracted, then spectral vegetation index was constructed based on different sensitive bands. On the basis, through analyzing bands correlation between chlorophyll density and spectral vegetation index, those influences for different components on chlorophyll density inversion of crop were explored. Some results can be found that when spectral information came from mixed canopy including vegetation and soil, sensitive bands for chlorophyll density were red light and near -infrared light. When soil spectra was removed, sensitive bands enlarged and showed in blue and green light region, and when spectra of shadow leaves were removed, sensitive bands indicated that visible light bands increased and near -infrared light bands decreased, there was the highest determination coefficient in red light region. Those change characteristics had same trend in different crops, this paper has important meaning for exploring inversion of biochemistry parameters on crop using data with combination image and spectra as one.

Key words: analyzing image and spectrum; spectral index; chlorophyll density; corn; soybean

## 0 引言

地面成像光谱仪在植被生理生化的定量分析中具有巨大的应用潜力<sup>[1]</sup>。但是,如何最大化发挥其“图谱合一”的优势是业界迫切需要解决的一个问题。常见的田间作物高光谱探测研究大都是利用地物光谱仪 ASD 展开的,该仪器获取的数据是地表不同地物组成的混合光谱,即由植被、土壤、杂草、作物秸秆等构成的混合体<sup>[2-4]</sup>,因其不能成像,致使它在作物养分遥感监测的量化研究中受到限制<sup>[5]</sup>;航空及航天遥感可以获得较大空间范围内的农作物高光谱影像,但因其空间分辨率的影响(米级分辨率),导致它不能深入到田块尺度去解释作物养分的转换机理,仅限于大尺度的作物养分遥感监测研究<sup>[6-8]</sup>;数码成像技术,不论是成像速度还是可操作性都受到研究者的青睐,一直是判断作物生命信息的重要手段<sup>[9-11]</sup>,但是因其仅能获取红、绿、蓝三波段的光谱信息且包含的信息量少,从而制约了它在作物养分诊断上的进一步应用<sup>[12-13]</sup>。上述三种光谱无损监测技术是传统遥感常用的观测手段,它们限于自身固有的不足,尚不能满足田间作物养分转换机理的研究要求。近年来,国内外出现的地面成像光谱仪正好填补了该领域研究的空白<sup>[14-15]</sup>。因其具有纳米级的光谱分辨率和厘米级、甚至毫米级的空间分辨率为田间作物养分的立体监测提供了新的技术手段<sup>[16]</sup>。

当前,学者大都利用成像高光谱系统在叶片尺度采集光谱信息后进行相关研究。参考文献[13-14]通

过成像高光谱系统采集大豆、小麦叶片的高光谱信息进行生化参数的定量反演研究。参考文献[15-16]在对叶片尺度的高光谱影像分类后,分割叶片上的病虫害面积并提取其光谱响应特征。然而,在田块尺度对作物高光谱成像数据进行地物分类后,解析作物生理生化参数的研究还较少。虽然一些学者利用成像光谱对不同施氮水平下的小麦进行了氮素反演建模研究<sup>[5,17]</sup>,但是建模时的光谱信息还是植被与背景地物的混合信息,没有深入挖掘纯植被光谱信息的优势。

在地面成像光谱仪获取的作物高光谱影像中一般存在四种不同组分:光照植被,光照土壤、阴影植被和阴影土壤。如何从遥感影像中准确、有效地分离不同组分,并研究它们对作物生理生化参数反演精度的影响,是近地成像高光谱在作物养分转换机理研究中的优势。文中把成像光谱仪定位为作物组分信息快速获取的观测传感器,在田间小尺度获取作物“图谱合一”数据,通过解析影像内各类地物(植被、裸土、光照叶片、阴影叶片)的光谱特征实现不同类型地物的分类与光谱提纯,并分析不同目标组分对作物叶绿素密度反演的影响,尝试在作物养分精确诊断方面进行新方法探索。

## 1 成像系统与数据处理

### 1.1 成像系统

文中使用的仪器是可见-近红外成像光谱仪(VNIS),工作示意图如图1所示。它由 Hamamatsu C8484-05G 高分辨率相机、V10E 光谱仪、外置扫描

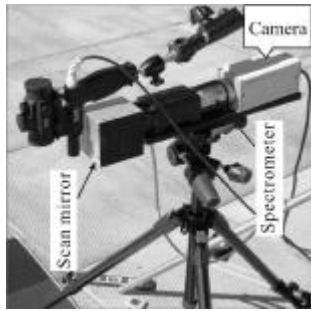


图 1 VNIS 外观图

Fig.1 External view of VNIS

镜构成。其中,光谱仪的光谱范围为 400~1 000 nm,光谱分辨率为 2.8 nm,光谱间隔为 2.4 nm,视场范围为 14°(水平)×11°(垂直)×18°(对角线);外置扫描镜

由仪器自带的软件 CSIspec-IS-lite (Channel Systems Inc, Manitoba, Canada)控制,通过扫描镜 360°旋转实现一幅图像的快速获取。

### 1.2 实验设计

2010 年 8 月至 9 月,在北京市昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地(40.18°N,116.27°E)采集大豆、玉米的成像数据。大豆品种为中黄 13,紧凑型;中黄 30,半紧凑型;玉米品种为京单 28,紧凑型;京科 25,中间型(见表 1)。于 2010 年 7 月 1 号播种,正常田间管理。每个小区播种面积 30 m<sup>2</sup>(长 6 m,宽 5 m),无作物操作区域宽 3 m,共计播种面积约为 957 m<sup>2</sup>(见表 2)。每个小区可种植玉米约 200 株,大豆约 200 株。

表 1 玉米和大豆种植信息

Tab.1 Planting information of corn and soybean

Crop type	Cultivars	Growth stage	Growth days	Sowing day	Height/cm	Canopy structure
Corn	Jingdan28	Big bell	50-54	July 8, 2010	65	Compact type
		Small bell	36-40	July 23, 2010	65	
	Jingke25	Big bell	50-54	July 8, 2010	60	Semi-compact type
		Small bell	36-40	July 23, 2010	45	
Soybean	Zhonghuang30	Flowering	60-65	July 8, 2010	28	Horizontal type
		Branching	30-40	July 23, 2010	24	
	Zhonghuang13	Flowering	60-65	July 8, 2010	30	Compact type
	Branching	30-40	July 23, 2010	26		

表 2 田间玉米、大豆种植安排

Tab.2 Planting layout of corn and soybean in the field

Experimental road							
Jingdan28(8)	Jingdan28(23)	Jingke25(8)	Jingke25(23)	Zhonghuang30(8)	Zhonghuang30(23)	Zhonghuang13(8)	Zhonghuang13(23)
Jingdan28(8)	Jingdan28(23)	Jingke25(8)	Jingke25(23)	Zhonghuang30(8)	Zhonghuang30(23)	Zhonghuang13(8)	Zhonghuang13(23)

### 1.3 数据获取与处理

#### 1.3.1 数据获取

当对玉米、大豆冠层进行成像时,先根据作物的高度决定探测器的观测高度。以玉米为例,小喇叭口期玉米株高 50cm,行距 30cm,为了保证视场内至少有一株完整的玉米,设定 VNIS 观测高度距玉米冠层 178cm,距地面 228cm,视场范围为 60cm×60cm 的正方形。在成像光谱数据采集时,同步用地物光谱仪 ASD 采集参考白板的数字量化值,实时记录当时的天气状况,为反射率转换进行原始数据获取。完成观测区的影像采集后,取两株玉米(大豆)活体植株进行叶绿素密度相关参数测定,以参考文献[18]中的测试内容为标准。

#### 1.3.2 影像处理

获取的遥感影像要转换成相对反射率才能用于作物的定量化反演研究,文中的反射率反演参考文献[19,31]的定标方法。

#### 1.3.3 光谱植被指数

植被指数是遥感应应用领域中用来表征地表植被覆盖度、生长状况的一个简单而有效的度量参量。它是选用遥感数据的两个或几个波段进行加、减、乘、除等线性与非线性组合方式运算,产生某些对植被长势、生物量等有一定指标意义的数值<sup>[20]</sup>。随着高光谱数据在地表植被生理生化参数反演中的深入开展,相应的光谱植被指数被提出并广泛用于植被的

生命表征监测<sup>[21]</sup>。文中使用的 VNIS 包含的光谱范围为 400~1 000 nm,可以通过不同波段的重新组合,形成不同形式的光谱植被指数。如公式(1)~(5)所示。

比值光谱指数(Ratio Spectral Index):

$$RSI = \frac{R(i, n)}{R(j, n)} \quad (1)$$

归一化差分光谱指数(Normalized Difference Spectral Index)

$$NDRSI = \frac{R(i, n) - R(j, n)}{R(i, n) + R(j, n)} \quad (2)$$

差值光谱指数(Difference Spectral Index)

$$DSI = R(i, n) - R(j, n) \quad (3)$$

土壤调节光谱指数(Soil-Adjusted Spectral Index)

$$SASI = \frac{1.5 \cdot (R(i, n) - R(j, n))}{(R(i, n) + R(j, n)) + 0.5} \quad (4)$$

最优土壤调节光谱指数 (Optimization of Soil-Adjusted Spectral Index)

$$OSASI = \frac{1.16 \cdot (R(i, n) - R(j, n))}{(R(i, n) + R(j, n)) + 0.16} \quad (5)$$

式中:  $R(i, n)$  和  $R(j, n)$  分别代表任意两个波长的光谱反射率;  $i, j$  为任意波长位置;  $n$  的范围为 400~1 000 nm。

光谱指数选择完成后,用 Matlab7.0 软件进行编程,采用矩阵的形式,将两两组合的所有波段构建的光谱指数与大豆、玉米的叶绿素密度拟合线性方程,计算相应的决定系数( $R^2$ ),绘制浓度决定系数图。

## 2 基于图谱解析的作物叶绿素密度反演及评价

### 2.1 大豆叶绿素密度反演及评价

不同株型的大豆在不同生育期覆盖度有较大变化,背景土壤在观测视场内的面积比例会对冠层反射率有较大影响。文中构建了光谱指数,详细解析光谱提纯(土壤光谱去除前后)对大豆叶绿素密度反演的影响。图 2(a1)~(a5)是混合植被冠层反射率与叶绿素密度决定系数图;图 2(b1)~(b5)是纯植被(土壤去除后)冠层反射率与叶绿素密度决定系数图;图2(c1)~(c5)是纯植被阴影叶片去除后冠层反射率与叶绿素密度决定系数图。图中颜色从暗色到亮色变化,图像越亮,表示决定系数越大,图像越暗,表示决定系数越小,由此确定光谱反射率与叶绿素密度相关性高的波段,从而为作物叶绿素密度的定量反演提供参考。

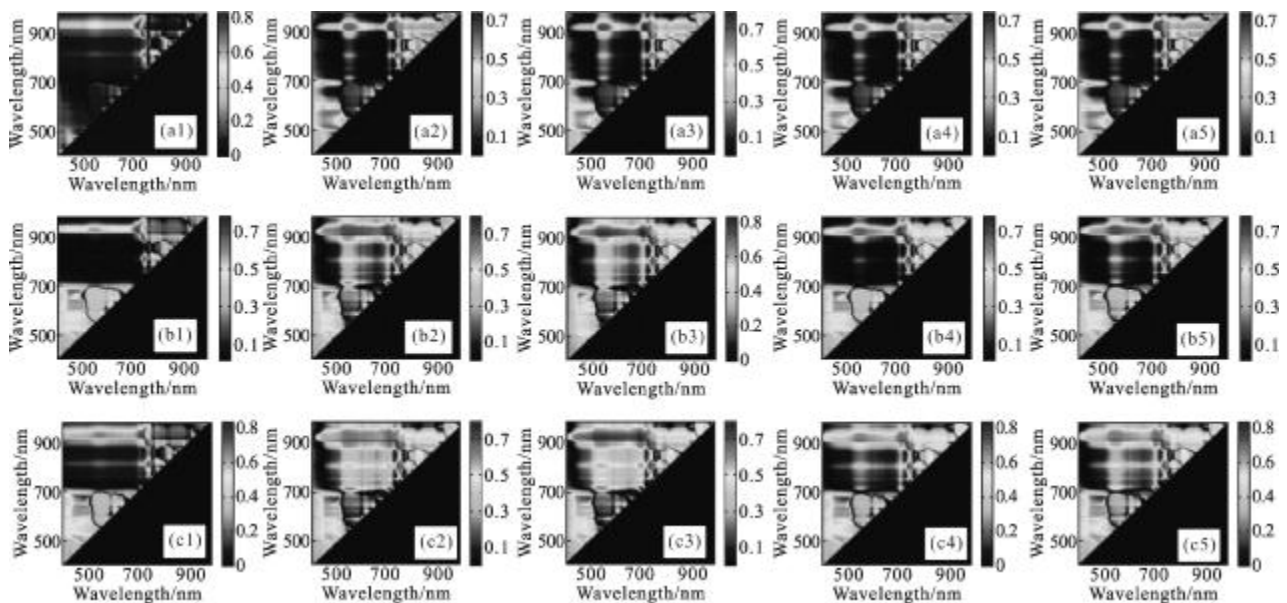


图 2 大豆叶绿素密度和 DSI、NDSI、RSI、SASI、OSASI 决定系数二维图

Fig.2 2D plots of determination coefficients ( $R^2$ ) between soybean chlorophyll density and different spectral indices (DSI, NDSI, RSI, SASI, OSASI)

Note: a1 - a5 represent 2D plots between chlorophyll density and different spectral indices from mixed soybean vegetation spectral reflectance; b1 - b5 mean the results of pure soybean vegetation; c1 - c5 imply the results of illuminated soybean vegetation. Fig. 3 and Fig.4 are same to Fig.2.

由图 2 可知,在大豆植被与土壤混合存在时,对叶绿素敏感的波段基本上都位于红光与近红外波段区间。这和 RVI、NDVI、DVI、SAVI、OSAVI 五种植被指数构建原理相符,即都是基于红与近红外波段进行组合运算实现的<sup>[21]</sup>。当植被光谱提纯后(剔除土壤光谱),它与叶绿素密度的决定系数如图 2(b1)~(b5)。由图可见,对叶绿素敏感的波段范围增大,尤其是蓝、绿波段。五种植被指数都表现为相同的规律。具体的变化区间见表 3。由此说明,背景土壤对利用光学遥感检测植被群体生化指标有较大影响,这和人研究结果一致<sup>[22]</sup>。对阴影叶片的植被光谱信息也

进行剔除,尝试分析阴影部分对遥感定量监测的影响程度(图 2(b1)~(b5))。比较图 2(c1)~(c5)和图 2(b1)~(b5)可知,植被阴影叶片光谱去除后,对叶绿素密度敏感的波段范围表现为可见光波段增加,近红外波段减少,红边波段决定系数最高。五种植被指数都有相同的规律。那么,可以说阴影叶片会影响植被叶绿素密度敏感波段的选择。当构建新型植被指数时,要根据植被冠层叶片结构,尝试把阴影比例作为一个影响因子,在公式中加以体现,以便提高叶绿素密度定量化反演精度。

表 3 是叶绿素密度和光谱提纯前后光谱指数的

表 3 大豆叶绿素密度和光谱指数的决定系数、入选波长、敏感区间

Tab.3 Determination coefficients, selected wavelengths and sensitive spectral ranges between soybean chlorophyll density and different spectral indices

Spectral index	R <sup>2</sup>	Wavelength λ1/nm	Wavelength λ2/nm	Sensitive spectral ranges (R <sup>2</sup> >0.71)	Change range
DSI	0.85	722	926	700-756,890-950	-
DSI-1	0.81	730	921	700-755,890-960	440-500,680-700
DSI-2	0.84	503	684	700-750,890-930	440-505,660-690
NDSI	0.74	727	922	712-740,889-928	-
NDSI-1	0.78	730	921	700-750,890-950	505-699
NDSI-2	0.80	710	711	700-750,889-920	450-505,680-712
RSI	0.77	716	926	700-750,890-940	-
RSI-1	0.80	706	926	520-750,890-940	520-550
RSI-2	0.81	710	711	480-740,910-930	480-699
SASI	0.74	727	922	700-740,890-920	-
SASI-1	0.78	730	921	700-740,890-920	660-690
SASI-2	0.83	503	684	680-690,890-920	450-505
OSASI	0.74	727	922	700-740,890-950	-
OSASI-1	0.78	730	921	700-740,890-950	520-570
OSASI-2	0.81	503	684	700-750,890-950	440-505,660-690

Note: DSI, NDSI, RSI, SASI, OSASI represent spectral reflectance of mixed soybean vegetation (soil and soybean vegetation), respectively. DSI-1, NDSI-1, RSI-1, SASI-1, OSASI-1 mean spectral reflectance of pure soybean vegetation (removed soil spectra), respectively. DSI-2, NDSI-2, RSI-2, SASI-2, OSASI-2 show spectral reflectance of illuminated pure soybean vegetation (removed spectral information of soil and shaded targets), respectively. Tab.5 and Tab.6 are same to Tab.4.

决定系数、入选波长、敏感区间列表,从中可以深入分析光谱提纯在经典植被指数间的变化,并最终说明成像光谱技术在具有一定物理意义的新型植被指数构建时有数据获取方面的独特优势。

由表 3 可知,对于差值光谱指数 DSI,当土壤与植被混合存在时,叶绿素密度与 DSI 的决定系数为 0.85,入选波长为 722 nm 和 926 nm;去除土壤光谱后,决定系数为 0.81,入选波长为 730 nm 和 921 nm。

对比两次结果,入选波长的位置都在红与近红外波段,但是决定系数数值下降。可解释为:差值植被指数是基于近红与红光波段提出的,当覆盖度高时,对植被的灵敏度下降<sup>[23]</sup>。文中剔除了影像中裸露土壤的光谱信息,可认为是植被覆盖度提高,所以决定系数数值出现降低趋势。继续对影像中阴影叶片反射率进行剔除,发现处理后的决定系数变化不大,但是敏感波段由红-近红外波段变为蓝-红波段 (503 nm,

684 nm), 这两个波段是与植被叶绿素紧密相关的。可初步得出, 在植被叶绿素密度的光学遥感诊断中, 出现在探测器视场中植被的阴影部分比例可以直接影响植被指数的选择。在对比光谱提纯前后的敏感波段范围时发现, 随着土壤与植被的分离, 蓝光波段的敏感性表现出来。上述分析结果表明, 影像中土壤及植被阴影对植被指数的选择有较大影响。

对于归一化差分光谱指数 NDSI, 光谱提纯前的敏感波段在红-近红外区间(727 nm, 922 nm), 背景土壤及阴影叶片光谱去除后, 敏感波段变为红边波段(710 nm, 711 nm), 但是蓝、绿光波段的敏感性显著增加, 这和人提出的归一化差异绿度指数、蓝-绿波段归一化差值植被指数监测植被生长活力的想法相符合<sup>[24-25]</sup>。同时, 由决定系数由低到高的变化趋势也可说明, 高生物量时 NDSI 容易受到饱和和信息困扰。对于比值光谱指数 RSI, 它在文中的表现特征和 DSI、NDSI 相似, 即土壤光谱剔除前, 入选的波段在红与近红外波段, 这和参考文献<sup>[26]</sup>研究的结果一致; 植被光谱提纯后, 可见光波段对叶绿素密度敏感性明显提高(图 2(b3)和(c3), 表 3), 在红边波段有最高的决定系数  $R^2=0.81$ 。前人研究表明: 该植被指数在植被覆盖度低时, 分辨能力明显下降; 当土壤去除后, 探测器视场中的植被覆盖度提高, 表现为决定系数增大, 符合该指数的应用规律。

对于土壤调节植被指数 SASI 和最优土壤调节植被指数 OSASI, 土壤光谱去除前后的决定系数差异较大, 可以判断背景土壤严重影响了植被指数的敏感性。阴影叶片去除前后的决定系数及敏感波段差异不大, 说明在探测器垂直获取的植被冠层光谱信息中, 阴影的影响比例远小于土壤, 且阴影叶片是植被生命信息的一部分, 能否人为消除其光谱去研究, 还有待深入研究。虽然前人一直研究背景土壤对植被冠层反射率的影响程度, 并把其作为先验知识或者常量加入到植被指数中用于提高植被指数反演精度, 但是普适性仍需进一步提高<sup>[27]</sup>。

在完成不同光谱指数与叶绿素密度决定系数分析的基础上, 对光谱提纯前后五种光谱指数的建模能力进行比较如表 4 所示。

从表中可见, 除了差值光谱指数, 其他四种指数都表现为光谱提纯后(土壤光谱剔除)反演叶绿素密度模型的决定系数提高。上述可解释为: 差值植被指

数因土壤剔除后的覆盖度增大使其估测的能力下降, 这和反演模型构建前得出的结果一致; 而其他四种光谱指数在实际应用中对土壤光谱比较敏感, 所以应用效果不理想。但是, 对影像中的土壤光谱进行剔除, 使研究对象由植被-土壤混合光谱变为纯植被光谱, 所以不论是叶绿素密度预测模型还是验证模型的决定系数  $R^2$  都有所提高。同时, 为评价其验证模型的精度, 还分析了数据的均方根误差。结果表明, 相比于混合植被光谱, 纯植被光谱的均方根误差较小, 且规律性明显。

表 4 基于光谱指数反演的叶绿素密度验证模型、决定系数( $R^2$ )与均方根误差(RMSE)

Tab.4 Validation models,  $R^2$  and RMSEs of chlorophyll density using different spectral indices

Spectral index	Equation	$R^2$	RMSE
DSI	$y=0.961x-1.808$	0.713	17.60
DSI-1	$y=1.026x-3.436$	0.699	17.54
DSI-2	$y=0.441x+4.289$	0.618	18.06
NDSI	$y=1.186x-6.180$	0.684	17.98
NDSI-1	$y=1.074x-3.956$	0.711	17.94
NDSI-2	$y=1.874x+72.74$	0.827	32.02
RSI	$y=1.020x-2.307$	0.720	6.26
RSI-1	$y=0.968x-1.644$	0.786	5.89
RSI-2	$y=0.976x-1.139$	0.827	12.89
SASI	$y=0.800x+0.834$	0.684	18.82
SASI-1	$y=1.064x-3.838$	0.710	18.05
SASI-2	$y=0.442x+4.271$	0.616	23.20
OSASI	$y=1.026x-3.276$	0.684	18.15
OSASI-1	$y=1.070x-3.909$	0.711	18.00
OSASI-2	$y=0.443x+4.275$	0.612	23.11

Note: Detailed meanings of some parameters listed in Tab.1.

由表 3 和表 4 还可知, 比值光谱指数反演叶绿素密度, 不论是预测模型还是验证模型都有较高的决定系数(预测  $R^2=0.80$ , 验证  $R^2=0.786$ ), 且验证模型的均方根误差最低(RMSE=5.89)。其他四个光谱指数的反演能力由决定系数和均方根误差共同比较后依次为: NDSI>OSASI>SASI>DSI。

此外, 论文对阴影叶片光谱进行剔除后, 分析光照叶片光谱反演叶绿素密度的能力(表 3 和表 4)。可以发现: 预测模型的决定系数较高, 验证模型的决定系数偏低, 均方根误差也较大。虽然土壤光谱和阴影叶片光谱去除后, 反演叶绿素密度的敏感波段由红-近红外区间向蓝、绿、红波段移动, 这和叶绿素的光

学估测机理一致,但是利用其反演叶绿素密度的验证结果较差,尤其是阴影叶片去除后。由此说明,阴影叶片对冠层光谱的贡献应该结合植被生长状态去研究,而不能简单地对其光谱进行分离,否则,基于光学遥感的植被生化参数反演将是不合理的。

## 2.2 玉米叶绿素密度反演及评价

上文重点分析了大豆冠层光谱提纯前后反演叶绿素密度的能力,初步结果是土壤光谱去除后,纯植被光谱与叶绿素密度的决定系数有所提高。但是,大豆作为低矮宽叶植被,叶片大而圆,在幼苗分枝期以后对地表都有较高的覆盖度,茎秆对冠层光谱的影响较小。为了更加突出背景土壤和茎秆对其冠层光谱的影响,选择玉米作为另一研究对象,主要考虑其有明显的叶片垂直分布,对地表的覆盖度较大豆低(二者的观测视场一致),且茎秆会影响玉米的冠层光谱。深入分析光谱提纯(土壤、阴影叶片光谱去除前后)对作物生化参数反演的重要意义。图 3 和图 2 代表意思相同,这里不再赘述。

从图 3 中可看出,在玉米与土壤混合存在时,对叶绿素密度敏感的波段基本上都在红与近红外波段区间,有些在蓝、红波段;总体的决定系数  $R^2$  较低,大部分在 0.5 附近。当去除土壤光谱后,即只剩下纯植被光谱,对叶绿素密度敏感的波段主要集中在红

光波段,有些在近红外与蓝光波段。决定系数  $R^2$  较前者有所提高,大部分大于 0.51,最高到 0.67。当阴影叶片光谱去除后,对叶绿素密度敏感的波段主要集中在蓝、红波段,五种高光谱指数结果差异较大,大部分决定系数降低到 0.45 左右。由敏感波段及决定系数可判断,土壤与阴影叶片光谱去除前后,植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性有较大变化,二者可以显著影响植被指数的应用效果。表 5 是不同光谱指数与叶绿素密度分析后的数据列表。

对于 DSI,光谱提纯前后决定系数的变化趋势是由大到小。当冠层覆盖度逐渐升高, $R^2$  反而下降,符合该植被指数的构建机理<sup>[20]</sup>。入选波长由红(757 nm)、近红(867 nm)变为蓝(508 nm)、红(689 nm)。虽然选择的波长位置在机理上和叶绿素更相关,但实际的相关决定系数反而降低。差值植被指数在实际应用中没有 NDSI、RSI、OSASI、SASI 等应用广泛,可能和其不确定的结果有关,因此,上述结果有待进一步分析。

对于 NDSI、RSI、OSASI、SASI 等高光谱指数,在光谱提纯前,对叶绿素密度敏感波段都出现在蓝(423 nm、453 nm)-近红外(953 nm)波段。参考文献[28-29]研究认为蓝光(445 nm、470 nm)与近红外波段(800 nm)进行比值、归一化等组合,能很好地反

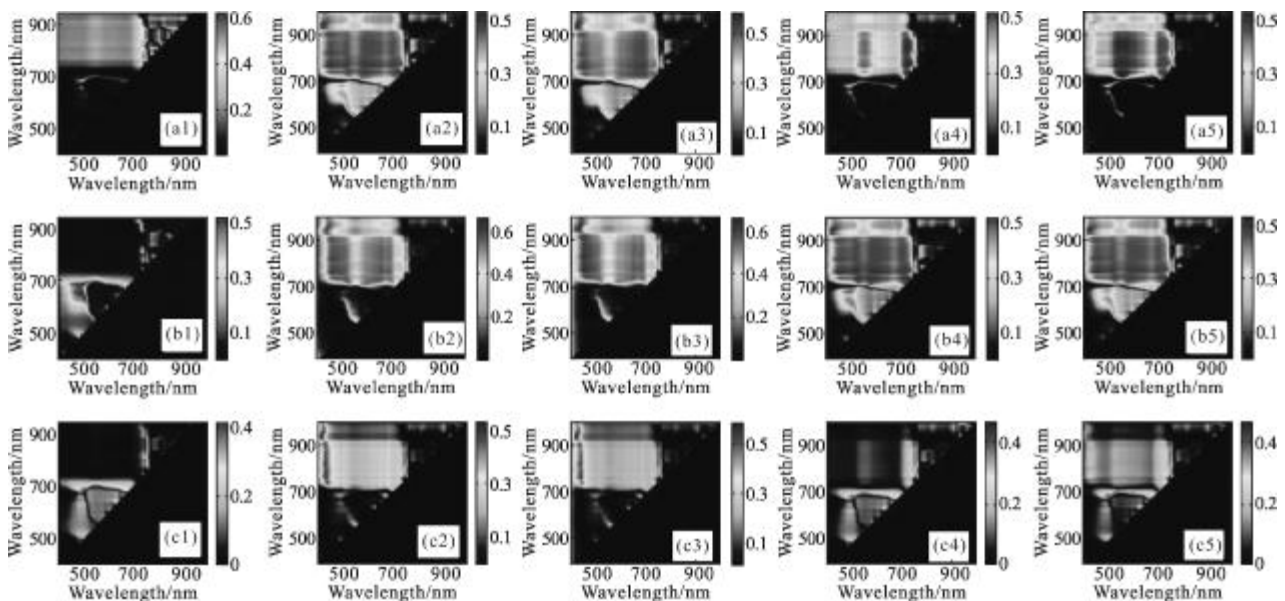


图 3 玉米叶绿素密度和 DSI、NDSI、RSI、SASI、OSASI 决定系数二维图

Fig.3 2D plots of determination coefficients ( $R^2$ ) between corn chlorophyll density and different spectral indices (DSI, NDSI, RSI, SASI, OSASI)

表 5 玉米叶绿素密度和光谱指数的决定系数、入选波长、敏感区间

Tab.5 Determination coefficients, selected wavelengths and sensitive spectral ranges between corn chlorophyll density and different spectral indices

Spectral index	R <sup>2</sup>	Wavelength $\lambda_1$ /nm	Wavelength $\lambda_2$ /nm	Sensitive spectral ranges(R <sup>2</sup> >0.51)	Change range
DSI	0.69	757	867	750-760,860-880	
DSI-1	0.59	507	689	440-510,605-695	440-510,605-695
DSI-2	0.46	508	689	-	-
NDSI	0.53	453	953	440-750,935-965	-
NDSI-1	0.66	453	757	420-520,730-910	420-440,730-910
NDSI-2	0.51	439	767	430-550,750-920	430-440,750-920
RSI	0.59	422	953	420-450,920-950	-
RSI-1	0.67	439	954	420-500,750-950	750-920
RSI-2	0.58	423	953	420-450,750-950	750-920
SASI	0.51	423	954	420-750,920-960	-
SASI-1	0.52	731	742	700-740,890-920	890-920
SASI-2	0.45	508	690	-	-
OSASI	0.53	423	953	700-740,890-950	-
OSASI-1	0.54	731	734	710-820	740-820
OSASI-2	0.47	679	681	-	-

演不同样本、不同条件下植被的胡萝卜素、叶绿素a。但是,文中选择的近红外波段在 953 nm,该结果可能是由在田间进行观测,背景地物和环境对其冠层都有贡献引起的。且前人与该论文是针对不同作物得出的结果,敏感波段是否稳定有待进一步探索。在光谱提纯后,对叶绿素密度敏感的波段组合变为蓝(453 nm)-红(757 nm)和红-红(731 nm, 734 nm)。参考文献[30]利用 757 nm 和 722 nm 比值进行植被不同覆盖度提取;参考文献[21]利用 750 nm 和 720 nm 定义的红边模型反演植被叶绿素浓度;参考文献[28]利用 600~735 nm 的叶绿素吸收累积指数反演植株的生化指标。这些参考文献都表明:在 720~760 nm 光谱范围内,植被光谱反射率能很好地用于叶绿素的反演,且在植被覆盖度、背景土壤等变化时表现明显。文中去除土壤光谱后得出的结果与前人结果相似。在只剩下光照叶片时,对叶绿素敏感的波段主要在 508 nm 和 680 nm 附近,叶绿素 a 与胡萝卜素在这两个波段有很强的吸收特征,与植被的反射光谱特征一致。但是决定系数都降低,说明在基于光学遥感的植被生化指标诊断中阴影叶片的分量是不能剔除的,否则会造成定量反演的误差。

综上所述,光谱提纯方法在玉米冠层光谱与叶绿素密度敏感性分析上是可以采用的,一些初步结

果和前人提出的一些植被指数应用结果相似,但是因获得的决定系数较低,并未进行模型构建及模型精度检验。

### 2.3 作物叶绿素密度反演及评价

大量科学文献表明,冠层结构参数(如叶片内部结构参数、叶面积指数、叶倾角分布函数等)会显著影响植被指数反演作物生化参数的准确性<sup>[29]</sup>。因此,基于植被指数建立单一预测模型的同时预测多种作物生化参数指标往往比较困难。参考文献[8]将玉米与小麦数据进行混合,利用混合数据筛选最优诊断植株氮浓度的光谱指数,探讨了建立单一模型预测多种作物植株氮浓度的可行性。上文分别对光谱提纯前后的大豆、玉米冠层光谱与叶绿素密度的敏感性进行了分析,表明二者有相同的趋势,这为单一植被指数在卫星或航空层面对大尺度作物生化参数进行反演提供地面理论支持。分析结果如图 4(同图 2 和图 3)和表 6 所示。

图 4 和表 6 表明,光谱提纯前后对叶绿素密度敏感的波段有明显变动,纯植被光谱与叶绿素密度相关的区间增多,在可见光波段表现明显,主要集中在红光波段。对阴影叶片进行剔除后,与叶绿素密度敏感的波段组合主要是蓝-近红和红-红组合,这与大豆、玉米单独提取时的结果相同。但是对冠层结构差异明



显的两种作物数据进行混合后,分析其与叶绿素密度的相关决定系数大小发现,植土混合时最大的决定系数高于纯植被的,这与单独研究时的结果不符。是否因选择的作物组合或试验样本的因素最终影响了混合数据的结果,有待进一步深入研究。但是有一点肯

定的是,随着土壤光谱的剔除,与叶绿素密度敏感的波段增多,且表现在叶绿素 a 和 b 及胡萝卜素强吸收的波段,因此从作物的反射光谱特征上看,文中选择的敏感波段区间是合理的。此外,因这里获得的决定系数较低,故并未进行模型构建及精度检验。

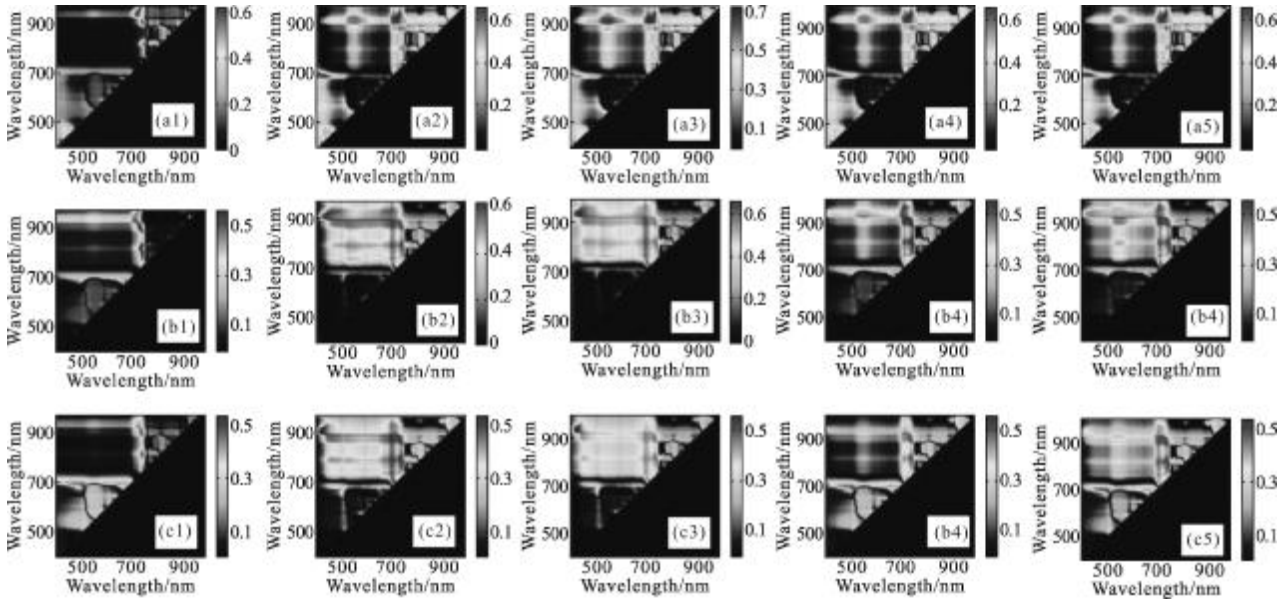


图 4 作物叶绿素密度和 DSI、NDSI、RSI、SASI、OSASI 决定系数二维图

Fig.4 2D plots of determination coefficients ( $R^2$ ) between crop chlorophyll density and different spectral indices (DSI, NDSI, RSI, SASI, OSASI)

表 6 作物叶绿素密度和光谱指数的决定系数、入选波长、敏感区间

Tab.6 Determination coefficients, selected wavelengths and sensitive spectral ranges between crop chlorophyll density and different spectral indices

Spectral index	$R^2$	Wavelength $\lambda_1$ /nm	Wavelength $\lambda_2$ /nm	Sensitive spectral ranges( $R^2>0.71$ )	Change range
DSI	0.63	734	955	730-740,920-960	-
DSI-1	0.59	739	817	700-740,760-830	880-930
DSI-2	0.57	509	689	500-510,690-700	-
NDSI	0.62	732	956	400-430,700-750	915-965
NDSI-1	0.61	716	718	700-730,890-950	-
NDSI-2	0.51	427	947	410-430,700-750	805-920
RSI	0.70	732	954	700-750,920-950	520-560
RSI-1	0.69	436	933	420-450,920-950	-
RSI-2	0.58	420	934	420-450,925-950	-
SASI	0.62	733	956	700-750,920-960	400-450
SASI-1	0.58	710	923	700-740,890-920	-
SASI-2	0.56	509	690	505-512,690-705	-
OSASI	0.60	733	956	607-740,925-960	-
OSASI-1	0.59	718	719	710-750,890-920	-
OSASI-2	0.55	508	690	500-505,690-705	-

### 3 结 论

在光谱提纯的基础上,对大豆、玉米及二者混合叶绿素密度进行反演,得出以下结论:

(1) 影像中土壤光谱去除前后,由 RVI、NDVI、DVI、SAVI、OSAVI 五种光谱植被指数对叶绿素密度敏感的波段变化情况得出,背景土壤对利用光学遥感数据反演植被叶绿素密度有较大影响。在对阴影叶片的光谱信息进行剔除后,通过五种光谱植被指数选择波段的变化区间说明,阴影叶片会影响植被冠层叶绿素密度敏感波段的选择,当构建新型植被指数时,要根据植被冠层叶片结构尝试把阴影比例作为一个影响因子在公式中加以体现,以便提高叶绿素密度量化反演的精度。

(2) 光谱提纯前后(大豆、玉米及其混合数据),对叶绿素密度敏感的波段有明显变动,纯植被光谱与叶绿素密度相关的区间增多,在可见光波段表现明显,主要集中在红光波段。对阴影叶片进行剔除后,与叶绿素密度敏感的波段组合主要是蓝-近红波段和红-红波段组合。

(3) 对冠层结构差异明显的两种作物(大豆与玉米)数据进行混合后,分析其与叶绿素密度的相关决定系数大小发现,植土混合时最大的决定系数高于纯植被的,这与单独研究时的结果不符。是否因选择的作物组合或试验样本的因素最终影响了混合数据的结果还有待进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Liu Bo. Plant information extraction based on field imaging spectrometer system [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [2] Haboudane D, Miller J, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 416-426.
- [3] Haboudane D, Miller J R, Pattey E. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90: 337-352.
- [4] Huang Wenjiang, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Remote sensing identification of plant structural types based on multi-temporal and bidirectional canopy spectrum [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 1-5. (in Chinese)
- [5] Tan Haizhen, Li Shaokun, Wang Keru, et al. Monitoring canopy chlorophyll density in seedlings of winter wheat using imaging spectrometer [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(10): 1812-1817. (in Chinese)
- [6] Yang Minhua, Zhao Chunjiang, Zhao Yongchao, et al. Research on a method to derive wheat canopy information from airborne imaging spectrometer data [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(6): 626-631. (in Chinese)
- [7] Song Xiaoyu, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data [J]. Precision Agriculture, 2009, 10(6): 471-487.
- [8] Chen Pengfei, Haboudane Driss, Nicolas Tremblay, et al. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 1987-1997.
- [9] Lukina E V, Stone M L, Raun W R. Estimating vegetation coverage in wheat using digital images [J]. Journal of Plant Nutrition, 1999, 22(2): 341-350.
- [10] Wang Keru, Li ShaoKun, Wang Chongtao, et al. Acquired chlorophyll concentration of cotton leaves with technology of machine vision[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 32(1): 34-40. (in Chinese)
- [11] Zhu Jinxia, Deng Jinsong, Shi Yuanyuan, et al. Diagnoses of rice nitrogen status based on characteristics of scanning leaf [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2171-2175. (in Chinese)
- [12] Wang Fangyong, Wang Keru, Li Shaokun, et al. Estimation of canopy leaf nitrogen status using imaging spectrometer and digital camera in cotton [J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(6): 1039-1048. (in Chinese)
- [13] Tong Qingxi, Xue Yongqi, Wang Jinnian, et al. Development and application of the field imaging spectrometer system[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14 (3): 409-422. (in Chinese)
- [14] Zhang Dongyan, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. In-situ crop hyperspectral acquiring and spectral features analysis based on pushbroom imaging spectrometer [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 188-192. (in Chinese)
- [15] Chai Ali, Liao Ningfang, Tian Lixun. Identification of cucumber disease using hyperspectral imaging and

- discriminate analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(5): 1357-1361. (in Chinese)
- [16] Christian Nansen, Tulio Macedo, Rand Swanson, et al. Use of spatial structure analysis of hyperspectral data cubes for detection of insect - induced stress in wheat plants [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30 (10): 2447-2464.
- [17] Inoue Y, Penuelas J. An AOTF-based hyperspectral imaging system for field use in ecophysiological and agricultural applications [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3883-3888.
- [18] Wang Jihua, Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang. *Basis and Application of Quantitative Remote Sensing in Agriculture* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 141-184. (in Chinese)
- [19] Zhang Dongyan. *Diagnosis mechanism and methods of crop chlorophyll information based on hypersepctral imaging technology* [D]. Hangzhou: Zhejiang Unversity, 2012. (in Chinese)
- [20] Huang Wenjiang. *Remote Sensing Monitoring of Crops Diseases Mechanism and Application* [M]. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 2009: 18-24. (in Chinese)
- [21] Haboudane D, Tremblay N, Miller J R, et al. Remote estimation of crop chlorophyll content using spectral indices derived from hyperspectral data [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing*, 2008, 46: 423-427.
- [22] Roshanak Darvishzadeh, Andrew Skidmore, Artin Chlerf, et al. Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in heterogeneous grassland [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 2592-2604.
- [23] Pearson R L, Miller L D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie[C]// *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment II*, 1972: 1355-1379.
- [24] Gitelson A A, Kaufman Y, Merzlyak M. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [25] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 542-553.
- [26] Yao Xia, Zhu Yan, Feng Wei, et al. Exploring novel hyperspectral band and key index for leaf nitrogen accumulation in wheat [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(8): 2191-2195. (in Chinese)
- [27] Eitel J U H, Long D S, Gessler P E, et al. Using in-situ measurements to evaluate the new RapidEye™ satellite series for prediction of wheat nitrogen status [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28: 4183-4190.
- [28] Peñuelas J, Gamon J A, Fredeen A L, et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves [J]. *Remote Sensing and Environment*, 1994, 48, 135-146.
- [29] Blackburn G A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentration: a test senescent tree leaves [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19 (4): 657-675.
- [30] Shaw D T. High-spectral resolution data for monitoring Scots pine regeneration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(13): 2601-2608.
- [31] Zhang Dangyan, Liang Dong, Zhao Jinling, et al. Research bidirectional reflectance characteristics of soybean canopy using multi-angle hyperspectral imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 787-797. (in Chinese)